

**Abstract**

The article represents the results of the numerical study of the spatial flow of an incompressible viscous fluid in the spiral case of the reversible radial-axial hydromachine, designed for head  $H=200$  m, in turbine mode. The spiral case with the angular coverage for  $\varphi_{cn}=360^\circ$  had round meridian sections, calculated according to the law of constancy of the velocity moment  $V_{\omega}r=\text{const}$ .

The calculations were performed using the software package FlowER-U for the model with the working wheel diameter  $D_1=350$  mm at the head  $H=1$  m. The studies were conducted for the numerical area taking into account or not the stator columns. The number of cells in the grid was about 1.2 million

The numerical studies permitted to obtain the distribution of the absolute velocity and its components: the circuit, radial and axial velocities, and the angle of flow, created by a spiral case in typical sections. The analysis of the impact of the presence of the columns on characteristics of the stator flow was carried out. The comparison of the calculated data with the results of gages studies on hydrodynamic stand showed good quantitative and qualitative agreement.

**Keywords:** numerical simulation, viscous flow, spiral case, hydromachine

УДК 66.061.38

# МЕМБРАННЕ ОЧИЩЕННЯ БІОГАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕЛЕКТИВНОГО РОЗЧИННИКА

І. А. Буртна

Кандидат технічних наук\*

Контактний тел.: 067-548-60-97

Л. І. Ружинська

Кандидат технічних наук\*

Контактний тел.: 050-961-75-15

О. О. Гачечиладзе

Кандидат фізико-математичних наук

Директор

ДП «Грузино-український дім»

пер. Музейний, 10, м. Київ, Україна, 01001

М. В. Шафаренко

Інженер I категорії\*

М. М. Мурашко\*

Контактний тел.: 050-632-57-63

E-mail: x.mifon.x@gmail.com

\*Кафедра біотехніки та інженерії

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Подорожчання енергоресурсів викликало необхідність застосування альтернативних енергоносіїв, зокрема біогазу. Але для ефективного його застосування необхідне поглиблене очищення, це вимагає пошуку нових шляхів реалізації процесу. Одним з напрямків виділення метану з біогазу є його очищення селективними розчинниками з використанням первопорачії для виділення самого розчинника. Для пошуку розчинника та здійснення процесу необхідно дослідити розчинення газів в різних розчинниках

**Ключові слова:** очистка біогазу, первопорачія, селективний розчинник

Подорожание энергоресурсов вызвало необходимость применения альтернативных энергоносителей, в частности биогаза. Но для эффективного его применения необходима более тщательная очистка, это требует поиска новых путей реализации процесса. Одним из направлений выделения метана из биогаза является его очистка селективными растворителями с использованием первопорачии для выделения самого растворителя. Для поиска растворителя и осуществления процесса необходимо исследовать растворение газов в разных растворителях

**Ключевые слова:** очистка биогаза, первопорачия, селективный растворитель

**1. Вступ**

Розділення багатокомпонентної газової суміші, що містить метан, вимагає пошуку нових більш ефективних шляхів реалізації процесу. Наприклад, комбінування різних, способів розділення. Пропонується до розгляду поєднання селективного розчинення метану в рідкому

поглиначі з наступним виділенням його за допомогою мембранних первопорачійних технологій.

Вибір ефективного селективного поглинача проводиться на основі порівняльного аналізу розчинності компонентів синтетичного газу на стані рівноваги між рідкою і газовою фазами.

Ефективність абсорбції метану з газової суміші залежить від початкової концентрації метану в ній. Для повторного використання ефективного селективного розчинника для процесу абсорбції доцільно очищення розчинника мембранними методами.

Вибір ефективного селективного поглинача проводиться на основі розрахункових залежностей для визначення умов рівноваги між рідкою і газовою фазами в процесі абсорбції метану та чисельного моделювання розчинності компонентів суміші газів в поглиначі та умов рівноваги між рідкою і газовою фазами дозволяють встановити ефективний селективний поглинач для метану.

## 2. Постановка задачі

Розчинність газів у рідинах складний процес, що характеризується термодинамічними параметрами, зокрема, тиском і температурою, а також хімічними властивостями газу та рідини.

Дані щодо розчинності газів у рідинах одержують переважно експериментальним шляхом, для вираження розчинності використовують коефіцієнт Генрі, з достатньою точністю залежність розчинності газу у рідині при невеликих значеннях розчинності апроксимується математичним виразом, що можна записати у виді:

$$f_2 = H_{21}^{(P_{vp1})_{x_2}} X_2, \quad (1)$$

де  $X_2 \leq 1$ ;  $X_2$  - мольна частка газу в рідині;  $f_2$  -

фугітивність газу, що розчиняється;  $H_{21}^{(P_{vp1})}$  - константа Генрі;  $(P_{vp1})_{x_2}$  - указує, що тиск системи при  $X_2$  дорівнює

тискові насиченої пари розчинника при температурі  $T$ .

Константу Генрі строго визначають так [1]:

$$H_{21}^{(P_{vp1})} = \lim_{x_2 \rightarrow 0} \left( \frac{f}{x} \right). \quad (2)$$

Аналіз показує, що точність цих залежностей недостатньо висока.

Приблизне визначення значень розчинності можна провести шляхом екстраполяції лінійної залежності логарифму тиску пари, що розчиняється  $P_{vp}$  від оберненої температури.

Для кількісної оцінки розчинності газу в рідині можна використовувати так звану ідеальну розчинність, що визначається за формулою [1]:

$$x_2 = \frac{y_2 P}{P_{vp2}}, \quad (3)$$

де  $P_{vp2}$  - тиск пари розчиненого газу при температурі системи  $T$ ;  $P$  - тиск пари у системі;  $y_2$  - мольна доля розчиненого газу в газовій суміші.

Ідеальна розчинність є функцією температури, але не залежить від розчинника.

## 3. Аналіз літературних даних

У літературі [1, 2] є дані щодо ідеальної розчинності і розчинності метану в різних розчинниках (розчинність  $x$  виражена в мольних частках).

Таблиця 1

Розчинність метану в різних розчинниках

| Розчинність метану $x \cdot 10^4$ | Ідеальна розчинність | n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> | CCl <sub>4</sub> | CS <sub>2</sub> | (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------------------|------------------|-----------------|------------------------------------|
|                                   | 35                   | 82,6                             | 28,4             | 13,12           | 22,3                               |

Таким чином, значення ідеальної розчинності та розчинності в конкретних розчинниках мають однаковий порядок, що дозволяє використовувати ідеальну розчинність для кількісної оцінки поглинальної здатності розчинників при температурах близьких 25<sup>0</sup>С і різних значеннях тиску у системі.

Відсутність експериментальних даних щодо фугітивності розчинників, тиску пари розчинників над розчином, викликає необхідність використання теоретичних розрахункових залежностей для визначення цих величин.

## 4. Основні дослідження

Експериментальна установка по виділенню метану із газових сумішей з використанням ефективного селективного поглиначі та мембранних первопорачієних технологій (рис. 1), включає три основні апарати: абсорбер (рис. 2), мембранний адсорбційний апарат, мембранний первопорачієний апарат (рис. 3). Також до складу установки входять термостат, балон з газовою сумішшю, ресивер, ємності, холодильники-конденсатори, колби, насоси, компресори, редуктори і вентелі. Крім того установка оздоблена контрольно-вимірювальними приладами.

Експериментальна установка працює у наступних режимах:

- підготовчий (підготовка установки до роботи);
- технологічний (виділення метану із газових сумішей);
- вимірювальний (визначення кількості виділеного метану);
- заключний (проведення регенерації мембранних елементів).

Підготовчий період (підготовка установки до роботи) – завантаження в установку ефективного селективного розчинника (поглиначі) та продувка абсорбера. Поглинач в кількості 12 літрів заливається в ємність 5. Далі, абсорбер продувається газовою сумішшю. Для цього на балоні 4 відкривається запірний вентиль, за допомогою редукторів, вмонтованих на балоні та абсорбері, встановлюється необхідний тиск (0.1 – 0.2 МПа) та витрати (4 – 5 л/хв.) синтетичного газу. Газова суміш з балона через запірний вентиль та редуктор подається в абсорбер, з якого через редуктор потрапляє в ресивер 6, потім через адсорбційний мембранний апарат 2 викидається в повітря (або збирається). Продувка проводиться протягом 5 хвилин.

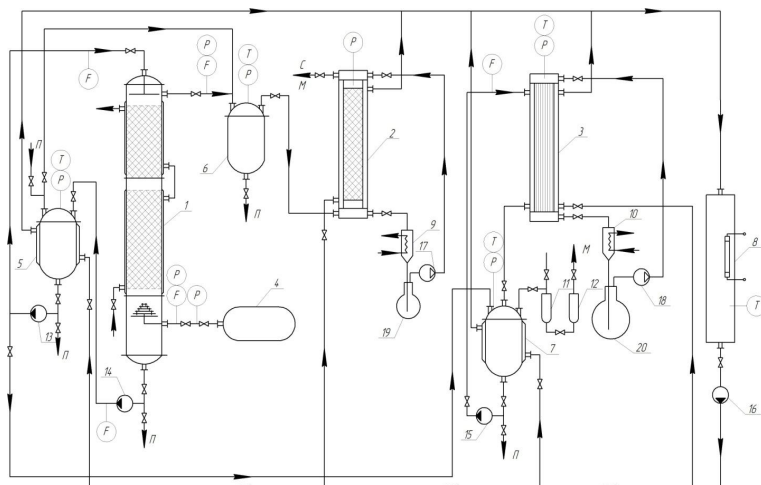


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки по виділенню метану із біогазу: 1 – абсорбер; 2 – мембранний адсорбційний апарат; 3 – мембранний первапораційний апарат; 4 – балон; 5 – емність; 6 – ресивер; 7 – емність; 8 – термостат; 9, 10 – холодильники-конденсатори; 11, 12 – емності; 13–16 – насоси; 17, 18 – компресори; 19–20 – колби. Р – тиск; Т – температура; F – витрата; П – поглинач; С – біогаз; М – метан

Технологічний період (виділення із газової суміші метану). Після проведення продувки, за допомогою редукторів, встановлюється необхідний тиск та витрати газової суміші (ці величини обумовлені планом проведення експериментів). Потім встановлюється необхідна продуктивність насосів 13, 14. На емності 5 та абсорбері 1 відкриваються необхідні вентиля. Поглинач із емності 5 насосом 13 подається до верхньої частини абсорбера 1, де встановлений розбризкувач, і стікає вниз по керамічній насадці. При стіканні по насадці він контактує з газовою сумішшю, яка з балона 4 через розподільний пристрій піднімається в верхню частину абсорбера. При контакті рідини та газової суміші відбувається селективне розчинення метану в ефективному поглиначі. Поглинач, який пройшов через насадку, збирається в нижній частині абсорбера і насосом 14 перекачується в емність 5. Потім поглинач знову подається в абсорбер і т.д. Таким чином установка працює по замкнутому циклу.

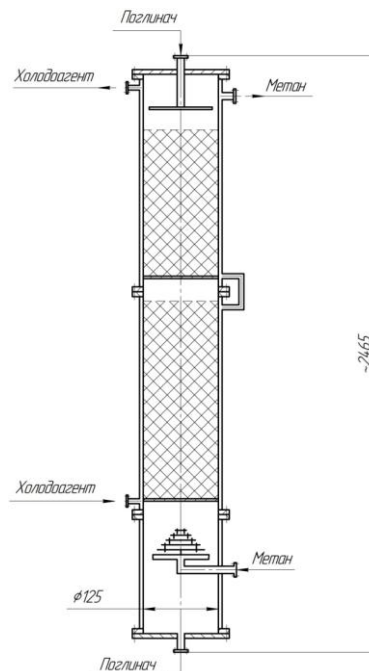
Газова суміш збіднена метаном, який може нести краплі поглиначу через ресивер 6 подається в мембранний адсорбційний апарат 2. Проходячи мембранний апарат газова суміш очищується від крапель поглиначу і виходить в повітря (або збирається). Під час роботи абсорбер 1 охолоджується холодною водою, яка подається в рубашку апарату.

При проведенні технологічного процесу вимірюються тиск та температури абсорбері 1, емності 5, ресивері 6 та мембранному апараті 2.

Вимірювальний період (визначення кількості виділеного метану). Після проведення процесу виділення метану із газової суміші вмикаються насоси 13 і 14, перекриваються всі вентиля і редуктори, які були задіяні у процесі. В рубашку емності 5 із термостату 8 подається гарячий теплоносіє (вода з температурою 30 °С), на емності відкривається вентиль, і метан, який виділяється з поглиначу, поступає в ресивер 6. Метан доти поступає в ресивер доки не

вирівнюється тиск в емності 5 та ресивері 6. Знаючи об'єм ресивера, емності і трубопроводів розраховуємо кількість метану. Потім на емності 5 перекриваємо вентиль, а метан через відповідний вентиль на ресивері виходить в атмосферу (або збирається). Для визначення метану, який залишився в поглиначі, із емності 5 поглинач 13 перекачується в емність 7. Із емності 7 поглинач насосом 15 по замкнутому контуру прокачується через мембранний первапораційний апарат 3. В апараті частина поглиначу проходить через мембранні елементи у вигляді пари, надходить в холодильник-конденсатор 10 і зливається в колбу 20 і вертається в емність 5. При цьому порушується рівновага поглиначем і розчиненням в ньому метані. Метан виділяється в емності 7 і поступає в емності 11 і 12, в яких вимірюється його об'єм. Мембранний апарат 3 і емність 7 обігрівается гарячою водою (температура 30 °С), яка проступає з термостату 8.

Заключний період (проведення регенерації мембранних елементів). Мембранні елементи, які знаходяться в адсорбційному мембранному апараті 2 насичуються поглиначем, тому необхідно проводити їх регенерацію. Для цього в рубашку мембранного апарату 2 з термостату 8 подається гаряча вода (температура 30 °С). При цьому пара поглиначу з мембранного адсорбційного апарату поступає в холодильник-конденсатор 9, із якого поглинач зливається в колбу 19 і в емність 5. Для інтенсифікації роботи мембранних апаратів в технологічних контурах останніх використовуються



компресори 17 і 18.

Рис. 2. Ескіз абсорбційного апарату з позначенням потоків

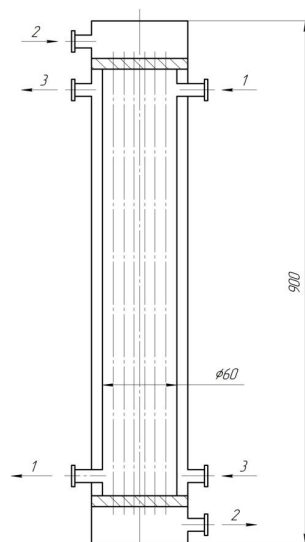


Рис. 3. Ескіз первопараційного мембранного апарату. Поверхня мембран 0,1 м<sup>2</sup>. Позначення потоків робочих середовищ: 1 — діетиловий ефір з метаном; 2 — пара діетилового ефіру; 3 — теплоносіє

## 5. Висновок

Створена експериментальна установка по виділенню метану із синтетичного газу для отримання необхідних даних і подальше їх використання у теоретичних розрахункових залежностях.

## Література

1. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей [Текст] / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд // Пер. с англ. под ред. Б.И. Соколова. – Л.: Химия, 1982 – с. 591.
2. Marerero T.R., Mason E.A. j. Psys. Chem. Ref. Data, № 1, 1972, 3.

## Abstract

Recently, the application of alternative energy resources has acquired significant interest. One of them is biogas. For many industries the production technology of biogas provides cheap disposal of organic wastes. But for its effective use the intensive purification is required. Thus, the separation of a multicomponent gas mixture, containing methane, requires the search of new ways of process implementation, for example, combination of different methods of separation. It is proposed to consider a combination of selective dissolution of methane in liquid absorber with its subsequent release, using membrane pervaporation technology.

The choice of the effective selective absorber is based on the calculated dependences for determination of the conditions of equilibrium between liquid and gas phases in the process of absorption of methane and numerical modeling of solubility of the gas mixture components in absorbers. Efficiency of the absorption of methane from the gas mixture depends on the initial concentration of methane in it. To reuse the efficient selective solvent for the absorption process, it is appropriate to clean the solvent using the membrane methods.

The article considers the experimental unit for the release of methane from gas mixtures using the efficient selective solvent and pervaporation for the release of the solvent. The method of the process of membrane methane release from biogas was described. The article presents the schematic diagram of installation, maquettes of membrane, absorption and pervaporation devices with the principle of operation.

**Keywords:** biogas cleaning, pervaporation, selective solvent